

Рис. 5. Схема газо-, воздухо-, дымопроводов регенеративной системы отопления одной зоны теплового регулирования:

- 1 – продукты сгорания из насадки; 2 – электромагнитный клапан;
 3 – природный газ на запальники; 4 – вентилятор; 5 – перекидной клапан;
 6 – дымосос; 7 – воздух на запальники; 8 – природный газ на газовые фурмы;
 9 – воздух в регенеративную насадку

Список использованных источников

1. Губинский В.И. Нагревательные печи металлургии – сегодня и завтра // Теория и практика металлургии. Днепропетровск. №6. 2004. С. 56-60.
2. Металлургические печи / Под научной ред. проф. докт. техн. наук М.А. Глинкова. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1951. – 578 с.

УДК 620.178.16;66.045.12

Г. Е. Масленников, В. А. Микула

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ ПГУ–ВЦГ ПО СХЕМЕ SHELL В ПАКЕТЕ CFD

Аннотация

В данной работе проводится численное моделирование поворотной камеры конвективного газоохладителя (ГО) парогазовой установки с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ–ВЦГ) по схеме Shell с помощью программного пакета CFD. Основной целью является верификация модели абразивного износа, которую в дальнейшем планируется использовать для де-

тального расчета эрозии поверхностей ГО. Эрозия рассчитывается при помощи модели Табакова–Гранта (Tabakoff–Grand). Сравнивая полученные результаты с аналогом [2], делается вывод, что верификация модели не закончена: полученные скорости эрозии занижены приблизительно в 2 раза (в нашем расчете максимальная скорость эрозии составляет 0,26 мм/год против 0,44 мм/год у корейских ученых), и отсутствует область эрозии у противоположной от входа стенки поворотной камеры. Следующим шагом планируется усложнить модель при помощи пористой поверхности, которая бы имитировала сопротивление всей длины газоохладителя.

Ключевые слова: ПГУ–ВЦГ, конвективный газоохладитель, поворотная камера, абразивный износ, CFD.

Abstract

Numerical modeling of the gas reversing chamber of a convection gas cooler for the Shell integrated gasification combined cycle (IGCC) process is carried out using the CFD software. The main scope is the verification of the abrasive wear model, which is planned to be used for detailed simulation of erosion of syngas cooler surfaces. Erosion is calculated using the Tabakoff–Grand model. Comparing the results with the analogue [2], it is concluded that the verification of the model is not completed. The obtained erosion rates are underestimated by approximately 2 times (in our calculation the maximum erosion rate is 0.26 mm/yr versus 0.44 mm/yr received by Korean scientists), and there is no erosion region at the opposite side of the gas reversing chamber. The next step is to complicate the model with a porous surface that specifies the pressure drop of the entire length of the gas cooler.

Key words: IGCC, convective gas cooler, gas reversing chamber, abrasive wear, CFD.

В настоящее время парогазовая установка с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ–ВЦГ) рассматривается как перспективная технология для производства электроэнергии, обеспечивающая более высокий КПД и более масштабное снижение выбросов CO₂ в противовес прямому сжиганию твердого топлива. Однако по техническим показателям такие установки ещё далеки от совершенства. Одним из путей повышения эффективности ПГУ–ВЦГ является применение теплообменных аппаратов – газоохладителей (ГО) для утилизации физической теплоты синтез-газа, полученного в газогенераторе. Оптимальной считается двухступенчатая компоновка ГО, где на первой стадии (охлаждение до температуры затвердевания шлака) возможно применение трех способов охлаждения: газовый, химический, радиационная рекуперация, на второй стадии возможна только конвективная рекуперация [1]. По нашему мнению, наиболее перспективной является конструкция конвективного ГО с трубными мембранными спиралями.

На рис. 1 изображен газификационный блок ПГУ–ВЦГ схемы Shell [2]. Синтез-газ после первой ступени охлаждения при помощи газорециркуляции поступает во вторую конвективную ступень через поворотную камеру. В ней поток газа резко разворачивается вниз и затем распределяется по каналам газоохладителя. Поверхности нагрева конвективного ГО подвержены газовой коррозии, абразивному износу и загрязнению. Абразивный износ, вызываемый потоком твердых частиц, также называется эрозионным износом или эрозией. Одними из наиболее весомых факторов, определяющих скорость эрозии, являются скорость и угол соударения частицы с преградой [3].

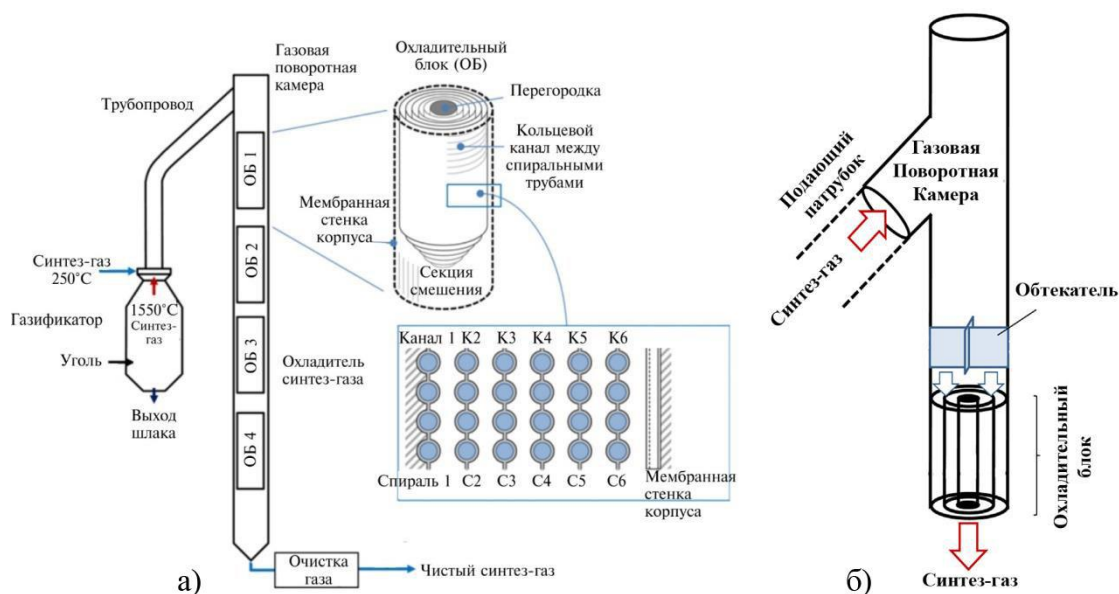


Рис. 1. Схема газификационного блока с конвективным газоохладителем и поворотной камерой ПГУ–ВЦГ схемы Shell

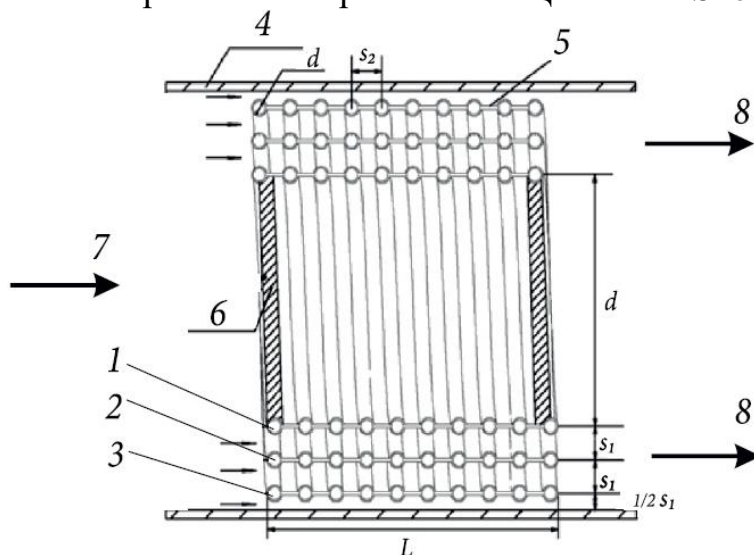


Рис. 2. Охладительный блок конвективного ГО со спиралевидными трубами:
1–3 – мембранные спирали; 4 – корпус; 5 – мембрана; 6 – перегородка;
7, 8 – вход и выход синтез-газа

В данной работе для получения характеристик потока синтез-газа с шлаковыми частицами на входе в конвективный ГО был выполнен расчет поворотной камеры в программном пакете CFD. Синтез-газ поступает в поворотную камеру по расположенному под углом в 45° подающему патрубку с диаметром 1,6 м. Затем в поворотной камере с диаметром 1,9 м и высотой 9,4 м поток разворачивается вниз и поступает в первую секцию конвективного ГО, состоящую из 6 мембранных трубных спиралей. На 0,7 м выше ГО установлен крестообразный обтекатель (рис. 1, б) [2]. Наружный диаметр труб $d = 66$ мм; относительный шаг между витками спирали $s_2/d = 2$; расстояние от оси труб внешней спирали до корпуса $0,5s_2$; центральная часть внутренней спирали закрыта перегородкой

(рис. 2) [4]. Поскольку данная работа не сосредоточена на исследовании характеристик газа в каналах газоохладителя, для упрощения расчета спирали смоделированы в виде цилиндрических поверхностей.

Расчетная модель состоит из газовой среды и твердых частиц. В таблице представлены основные начальные параметры синтез-газа [2]. Диаметр частиц варьируется от 2 до 100 мкм, их плотность 2800 кг/м³. Турбулентность учитывается с использованием k–ε модели. Расчетная сетка выполнена гексаэдрической с количеством ячеек 1600740. Значения детерминанта 3х3х3 составляют более 0,85 для 97 % клеток, а самое низкое значение было 0,67, что указывает на то, что сетка достаточно регулярна. Минимальный внутренний угол составляет более 60° для 90 % клеток, а наименьшее значение – около 32°. Косые клетки были обнаружены вблизи соединения подающего патрубка и самой поворотной камеры. Как правило, для большинства решателей приемлемыми считаются минимальный угол более 18° и детерминант, превышающий 0,2 [2].

Таблица

Исходные данные

Параметры		Величина
Синтез газ	массовый расход, кг/с	113,1
	температура, °С	782
	рабочее давление (абс.), бар	43
	CO (% об.)	59,2
	CO ₂ (% об.)	5,1
	H ₂ (% об.)	28,5
	N ₂ (% об.)	7,2
Шлак	массовый расход, кг/с	1,83
	плотность, кг/м ³	2800
	количество частиц	44632

Эрозия рассчитывалась при помощи встроенной модели Табакова–Гранта (Tabakoff–Grand):

$$E = \left\{ 1 + C_K K_{12} \sin \left(\frac{90}{\beta_0} \beta \right) \right\}^2 \left(\frac{V}{V_1} \right)^2 \cos^2 \beta \left[1 - \left(1 - \frac{V}{V_3} \sin \beta \right)^2 \right] + \left(\frac{V}{V_2} \sin \beta \right)^4, \quad (1)$$

где E – скорость эрозии, определяется как отношение потери массы преграды к массе ударяющих частиц, мг/кг; V – скорость соударения, м/с; β – угол падения частиц в градусах; β_0 – угол падения частиц, при котором достигается максимальная скорость эрозии; C_K – коэффициент восстановления при ударе в тангенциальном направлении, $C_K = 0$ при $\beta \leq 3\beta_0$ и $C_K = 1$ при $\beta > 3\beta_0$; K_{12} , V_1 , V_2 , V_3 – эмпирические константы. В нашем случае для стальной поверхности, подверженной воздействию частиц угольной золы, эмпирические константы в соответствии с [5] равны: $K_{12} = 0,296077$; $V_1 = 248,4$ м/с; $V_2 = 203,8$ м/с; $V_3 = 198,8$ м/с; $\beta_0 = 25^\circ$.

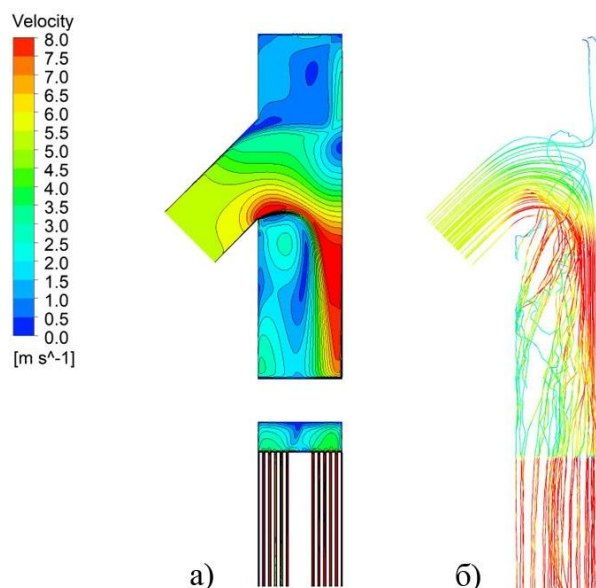


Рис. 3. Скорости синтез-газа и частиц в поворотной камере

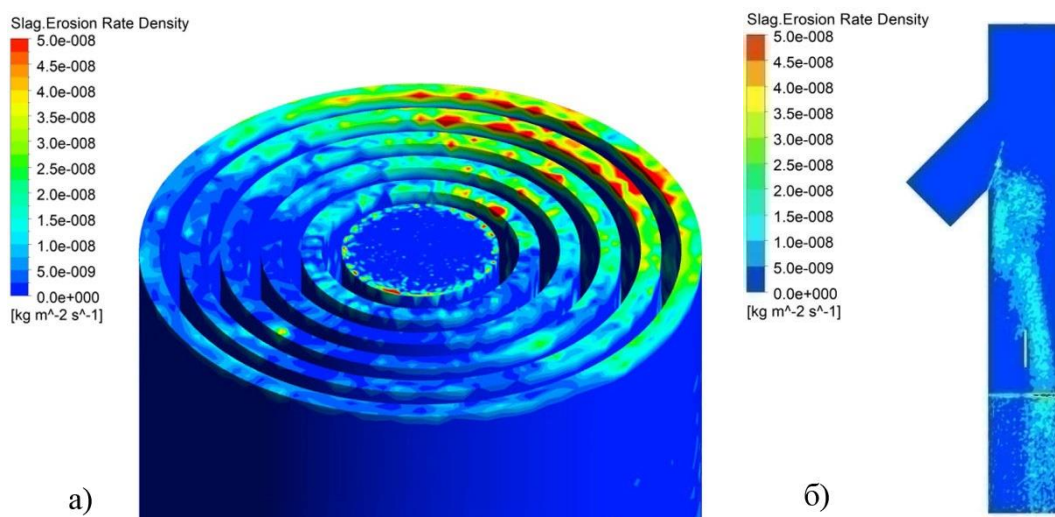


Рис. 4. Распределение скорости эрозии на входной поверхности ГО и на стенках поворотной камеры

На рис. 3а показано поле скоростей газа по сечению поворотной камеры. Можно видеть, что поток распределяется неравномерно: основная часть прилегает к противоположной от входа стенке, в этой области скорость достигает 8 м/с, что превышает скорость газа на входе – 5,5 м/с. Как следствие, неравномерно распределяется поток частиц по каналам ГО (рис. 3, б), это также приводит к более интенсивному износу поверхностей ГО, расположенных у дальней от входа стенки (рис. 4, а), здесь скорость эрозии соответствует 0,26 мм/год. Также эрозии подвержено место соединения подающего патрубка и поворотной камеры (рис. 4, б).

Сравнивая полученные результаты с аналогом [2], можно сделать вывод, что верификация модели не закончена: полученные скорости эрозии занижены приблизительно в 2 раза (0,44 мм/год) и отсутствует область эрозии у дальней стенки; предположительно это вызвано тем, что в нашем расчете не учитывается сопротивление всей длины газоохладителя.

Следующим шагом планируется усложнить модель при помощи пористой поверхности, которая бы имитировала сопротивление всей длины газоохладителя. Надеемся, что это позволит закончить верификацию модели поворотной камеры и приступить к целевому расчету абразивного износа поверхностей газоохладителя.

Список использованных источников

1. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля: монография / Н.А. Абаймов, И.Б. Амарская, В.С. Белоусов [и др.] / под ред. А.Ф. Рыжкова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 564 с.
2. Gas and particle flow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process/ P. Sangbin, Y. In-Soo, O. Junho, R. Changkook, K. Ja Hyung // Applied Thermal Engineering. 2014. № 70. P. 388-396.
3. Li M.J., Tang S.Z., Wang F.L., Zhao Q.X., Tao W.Q. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment // Applied Thermal Engineering. 2017. № 126. P. 737-761.
4. Modeling and analysis of a syngas cooler with concentric evaporator channels in a coal gasification process / J. Oh, In-S. Ye, S. Park, C. Ryu, S. Ku Park // Korean J. Chem. Eng. 2014. № 31(12). P. 2136-2144.
5. Tabakoff W., Kotwal R., Hamed A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles // Wear. 1979. № 52. P. 161-173.

УДК 621.745.343

В. И. Матюхин, А. В. Хандошка, С. Я. Журавлев, А. В. Матюхина
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕПЛОВАЯ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ РАБОТА В МИНЕРАЛОВАТНОЙ ВАГРАНКЕ

Аннотация

Главным агрегатом для получения минерального расплава в промышленности является вагранка, строение которой характеризуется простотой изготовления и обслуживанием, высокой удельной производительности (до 100–150 т/м² сутки), высокой степени расходования тепла, непрерывность процесса плавки и экономичностью. Строение агрегатов отличается нерациональностью профиля рабочего пространства, неудовлетворительное состояние тепловой и газодинамической работы, отсутствие реальных способов воздействия на процесс плавления, обеспечивая получение расплава в количестве не выше 3 т/ч, среднем удельном расходе кокса до 240–270 кг/т и уровне температуры перегрева не более 1350–1400 °С.

Исследования тепловой и газодинамической работы минераловатной вагранки на основании расчетов зональной балансовой модели показали, что получение минерального расплава